УДК 681.51.001.4

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКОЙ

А.А. Зоркальцев, В.П. Кривобоков, С.В. Юдаков

НИИ ядерной физики при ТПУ
E-mail: krivobokov@npi.tpu.ru

Описан опыт разработки системы управления плазменным оборудованием. В качестве базового объекта использована промышленная установка «Опал-3», разработанная в НИИ ядерной физики при ТПУ и предназначенная для нанесения многослойных теплоотражающих покрытий на поверхность листового стекла с помощью ионных пучков и плазмы магнетронного разряда на постоянном токе. Кратко отражены её конструкция и технологические возможности. Обоснован выбор структуры системы управления и некоторых технических решений. Описаны элементы программного обеспечения. Затронуты вопросы практического создания реальной системы управления, её настройки, ремонта и опыта эксплуатации.

Введение

Методы целенаправленного улучшения физических свойств твёрдых тел с использованием специальных модифицирующих покрытий нашли сегодня широкое применение в промышленности. Наибольшие успехи были достигнуты благодаря плазменным технологиям, которые не имеют реальной альтернативы в оптике, электронике и других областях. Их распространение привело к образованию целой отрасли в вакуумном машиностроении и существенно стимулировало развитие смежных вопросов материаловедения, приборостроения и т.д.

Отличительной особенностью производств с использованием плазмы является очень высокая чувствительность качества продукции к технологической дисциплине. Невозможно добиться высоких результатов без строгого выполнения требований к стабильности параметров технологического процесса в пределах заданного диапазона. Практика показывает, что при управлении плазменными установками операторы часто ошибаются из-за того, что физиологические возможности человека весьма ограничены. Это приводит к сбоям и снижению эффективности производства. Поэтому много внимания уделяется системам управления подобного оборудования, и вполне естественным выглядит стремление разработчиков минимизировать здесь значение человеческого фактора.

Цель настоящей работы – изложить опыт авторов в создании системы управления промышленной вакуумной установкой, снабжённой источниками плазмы магнетронного типа и ускоренных ионов, и предназначенной для нанесения теплоотражающих покрытий (ТОП) на поверхность строительного листового стекла.

Постановка задачи. Описание технологического процесса

Назначение установки – нанести на поверхность стекла тонкослойное покрытие, которое должно быть прозрачным в видимой области спектра и непрозрачным в инфракрасной. Благодаря этому оно сохраняет свои функциональные свойства светопрозрачного ограждения, но препятствует потерям тепла в виде инфракрасного излучения.

Эти требования носят противоречивый характер. Расчёты показывают, что оптимум коэффициента пропускания видимого света обычно лежит в области 0,80...0,90, а коэффициента отражения инфракрасного излучения – в интервале 0,85...0,95. Такого результата можно добиться двумя путями. Первый предполагает использования покрытия широкозонных полупроводников в виде оксидов типа SnO_2 (95 %) – In_2O_3(5 %). Второй построен на применении металлических плёнок (например, плёнки серебра, обе поверхности которой защищены пассивными в химическом отношении барьерными слоями {Ni(80 %) – Cr(20 %)} очень малой толщины), просветлённых оксидами металлов с большим коэффициентом преломления. Практика показала, что вторая схема имеет более широкие возможности, хотя многослойные покрытия не обладают значительной прочностью и весьма чувствительны к условиям хранения и эксплуатации стекла.

В наших работах [1, 2] был обоснован выбор структуры и материального состава ТОП вида SnO_2 (35 нм) – {Ni-Cr}(1 нм) – Ag (10 нм) – {Ni-Cr}(1 нм) – SnO_2(35 нм). По соотношению «сложность технологии – качество физических характеристик» такое покрытие является весьма привлекательным, и мы его положили в основу нашей производственной линии.

Процедура осаждения ТОП на поверхность стекла на готовой к работе установке включает в себя следующие операции.

1. Обработка поверхности стекла с помощью пучка ускоренных ионов с целью удалить загрязнения с его поверхности.
2. Осаждение первого слоя SnO_2.
3. Осаждение барьерного слоя из сплава {Ni-Cr}. Помимо защиты серебра он имеет дополнительную функцию – несколько снизить его диффузию в плёнку оксида олова.
4. Осаждение плёнки серебра, которая является основным элементом, препятствующим переносу инфракрасного излучения.
5. Осаждение второго барьерного слоя. Он способствует защите серебряной плёнки от окисления.
6. Осаждение второго слоя оксида олова с целью просветления покрытия.

Реализация этой технологии заключает в себе много трудностей, связанных с управлением процессами подготовки оборудования и осаждения покрытий. Некоторые процедуры являются очень короткими. Другие требуют очень высокой стабильности работы источников плазмы. Третьи зависят от электрофизических свойств диодного пространства (например, наличия или отсутствия в нём обрабатываемого стекла). Всё это создаёт некоторые трудности в организации системы управления технологическим процессом. Кинетические особенности технологических процедур таковы, что многие их параметры кроме этого меняются и в зависимости от состояния окружающей среды (температура, влажность и др.), продолжительности работы в предшествующих циклах (степень износа мишеней магнетронов), качества сырого стекла (которое может меняться в зависимости от источника его поступления) и других факторов. Поэтому необходимо, чтобы оператор постоянно следил за этими факторами и по мере необходимости вносил поправки в контролируемые параметры. Это требует от него известной профессиональной квалификации и внимательности.

Под эту технологическую схему в НИИ ядерной физики при ТПУ была спроектирована и изготовлена установка "Опал-3", основные функциональные (производственные) характеристики которой представлены в статье [3]. Для неё была разработана специальная система управления, отвечающая условиям, изложенным выше. Ниже будут представлены соображения, положенные в основу её проектирования, и описание основных свойств.

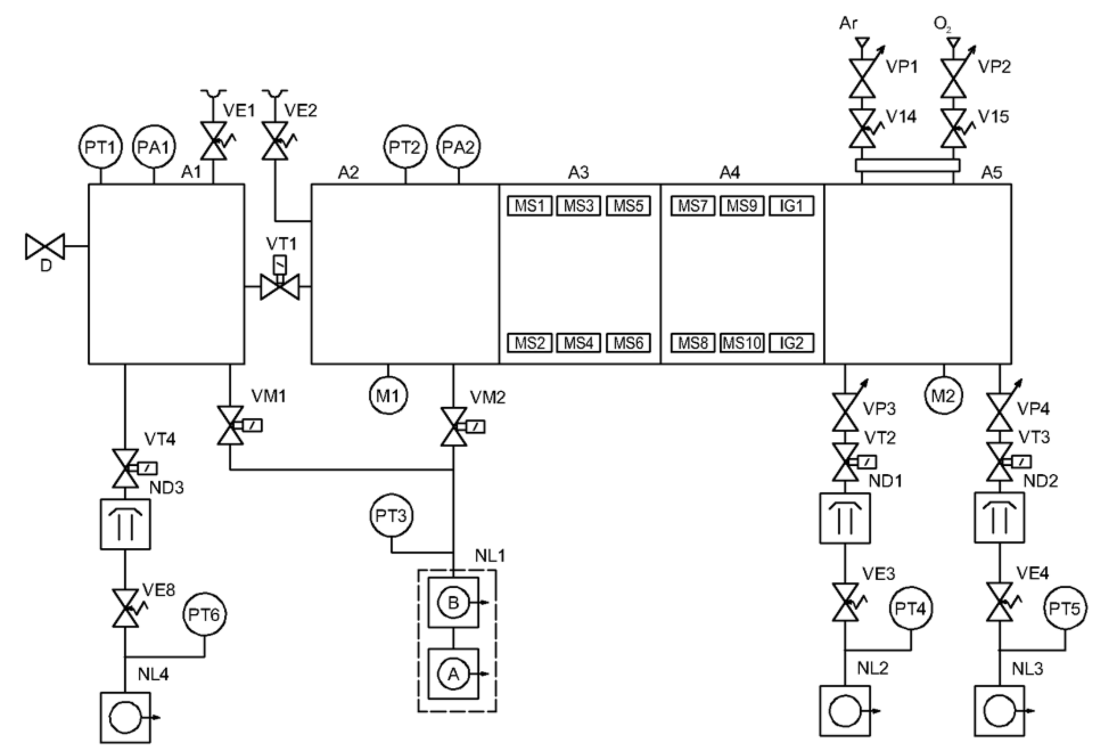


Рис. 1. *Вакуумная схема установки «Опал-3» (А1 – шлюзовая камера, А2, А4 – реверсивные камеры, А3, А4 – рабочие камеры, VT1 – щелевой затвор, VT2–VT4 – вакуумные затворы, NL1–NL4 – форвакуумные насосы, ND1–ND3 – диффузионные насосы, VM1, VM2, VE1–VE4, VE8 – вакуумные клапаны, VP1, VP2 – натекатели рабочего газа, V14, V15 – электромагнитные клапаны, VP3, VP4 – дроссельные заслонки, PT1–PT6 – термопарные вакуумные лампы, PA1, PA2 – ионизационные вакуумные лампы, M1, M2 двигатели привода каретки со стеклом, D – дверь загрузочной камеры)*

Основные элементы установки как объекты управления

Установка «Опал-3» (рис. 1) состоит из следующих связанных между собой подсистем:

1. вакуумной;
2. напуска рабочего газа;
3. электропитания магнетронов и ионных источников;
4. транспортной (перемещение каретки со стеклом относительно источников плазмы и ионных пучков);
5. охлаждения установки;
6. оптического контроля качества покрытий.

Вакуумная и подсистема напуска рабочего газа предназначены для поддержания рабочего давления (разрежения) и состава газовой среды в вакуумных камерах.

Вакуумная подсистема включает в себя рабочие, шлюзовую, реверсивные камеры, вакуумные насосы (форвакуумные НВР-250Д, ДВН-150 и диффузионные НВДМ-630), щелевой затвор, угловые затворы 23ВЭ-400, клапаны, трубопроводы, а также датчики и приборы контроля давления. Подсистема напуска рабочего газа содержит баллоны со сжатым газом (Ar, O_2), клапаны (НМБ-1), трубопроводы и натекатели (устройства, контролирующие величину потока рабочего газа, поступающего в вакуумную камеру) типа 1179 фирмы MKS (Франция).

В качестве источников плазмы и ионных пучков использованы соответственно планарные магнетроны на постоянном токе [4] и протяжённые источники ионов с замкнутым дрейфом электронов [5]. Подсистема электропитания магнетронов и ионных источников включают в себя блоки питания, а также сопутствующие защитные и распределительные устройства.

Транспортная подсистема предназначена для перемещения кассеты с обрабатываемым стеклом внутри рабочей камеры относительно источников плазмы и ионных пучков. Она состоит из механической и электрической частей.

Подсистема охлаждения установки состоит из клапанов, датчиков потока и системы охлаждения рабочей жидкости – обычно, воды. Охлаждению подлежат вакуумные насосы, магнетроны, ионные источники, двери вакуумных камер, блоки питания. Мощность отводимого потока тепла может достигать 100 кВт.

Оптический контроль качества обеспечивает контроль нанесенного покрытия на поверхность стекла, как внутри камеры во время технологического процесса, так и по окончанию технологического процесса на выходе из вакуумной камеры. В простейшем случае эта подсистема может состоять из источника света, монохроматора и оптоэлектронного преобразователя [6].

Структура системы управления

Можно выделить три основных функции системы управления данной установкой:

1. информационная (сбор, обработка, хранение информации о технологических параметрах и управляющих воздействиях, решение вычислительных задач, формирование отчетов, визуализация);
2. управляющая (технологические защиты и блокировки; автоматическое регулирование, все виды автоматизированного управления);
3. сервисная (диагностика датчиков, сетевых связей).

Наиболее оптимальным способом построения [7] системы управления промышленной плазменной установки, как показывает практика, является – децентрализованный.

Это означает, что некоторые компоненты установки, такие как натекатели рабочего газа, электроприводы, блоки питания магнетронов и ионных источников являются «интеллектуальными» и имеют в своем составе специализированные контроллеры, позволяющие этим устройствам работать автономно. Центральный контроллер осуществляет координацию работы всех устройств путем непосредственного управления исполнительными механизмами и задания параметров для работы «интеллектуальных» устройств. В качестве центрального контроллера использован программируемый логический контроллер (ПЛК) фирмы PEP Modular Computers (Германия). В наших системах управления ПЛК не выполняет задачу поддержания технологических параметров непосредственно, поэтому цикл работы его программы может быть в пределах 100 мс. Опыт эксплуатации установок класса «Опал» свидетельствует, что этого вполне достаточно.

В системе управления выделяется четыре уровня:

1. Датчиков и исполнительных устройств (вакуумные датчики давления, натекатели рабочего газа, вакуумные и форвакуумные насосы, вакуумные затворы, клапаны и т.д.).
2. Модулей сопряжения с объектами управления.
3. ПЛК, который обеспечивает контроль и управление всей установкой.
4. Оператора/технолога (персональный компьютер IBM PC и пульт оператора).

Программное обеспечение

Обычно в системе управления существуют блокировки на всех четырех уровнях, которые при сбое в работе оборудования (в том числе ПЛК) или из-за некорректных действий оператора не дадут возможности выйти из строя отдельным устройствам, таким как вакуумные затворы, привод каретки со стеклом и т.д.

Применение персонального компьютера позволяет значительно снизить требования к оператору. Система управления организована так, что оператору не нужно держать в памяти режимы работы

оборудования и значения параметров технологического процесса (рабочее давление, скорость перемещения каретки, ток и напряжение источников ионов). После их фиксации от оператора требуется выполнить только загрузку кассеты с обрабатываемым стеклом и выгрузку стекла после окончания цикла. Все действия оператора установки, а также состояние всего технологического оборудования протоколируются компьютером и в конце рабочего дня записываются в архив, впоследствии эта информация используется для быстрого выявления и устранения возможных неисправностей.

В систему управления заложены три функции, которые значительно облегчают работу оператора.

1. Автоматический запуск установки по таймеру. Эта функция заключается в подготовке установки к работе до начала рабочей смены. Она реализована в персональном компьютере и включает в себя запуск форвакуумного насоса, вывод на рабочий режим диффузионного насоса, достижение рабочего давления в вакуумной камере. Время разогрева диффузионного насоса НВДМ-630 на практике составляет не менее 50 мин. Это означает, что старт запуска установки должен быть дан примерно за 80 мин до начала рабочего дня.
2. Автоматическое выключение. Функция реализована на уровне ПЛК и заключается в охлаждении диффузионного насоса, а затем отключении всего вакуумного оборудования. Её выполнение не требует присутствие обслуживающего персонала.
3. Отработка аварийных ситуаций. При выходе параметров технологического оборудования за допустимые пределы осуществляется перевод всего оборудования установки в безопасное состояние согласно алгоритмам ПЛК.

Конструктивные особенности

В составе установки имеется 2 ионных источника, 10 магнетронов, 3 диффузионных, 5 механических вакуумных насосов, 3 вакуумных, 1 шлюзовой затвор и 9 вакуумных клапанов.

Для управления вакуумной установкой используются 59 выходных каналов ПЛК 24 В, 55 входных каналов ПЛК 24 В, 4 интерфейсных канала RS-485, один канал ETHERNET, один канал RS-232C. В качестве ПЛК выбран контроллер IUC32 фирмы PEP Modular Computers (Германия). Программирование его осуществлялось в среде ISaGRAF v. 3.32. Структурная схема системы управления изображена на рис. 2.

Для контроля давления в вакуумной системе был выбран вакуумметр Multi-Gauge фирмы Varian, который имеет 6 каналов для термопарных и 2 – для ионизационных преобразователей. В вакуумметр встроен интерфейс RS-485, посредством которого осуществляется сбор информации о значениях измеряемых давлений, а также о состояниях самих датчиков.

Натекатель 1179, хорошо зарекомендовавший себя в установке «Опал-2», также имеет в своем составе интерфейс RS-485.

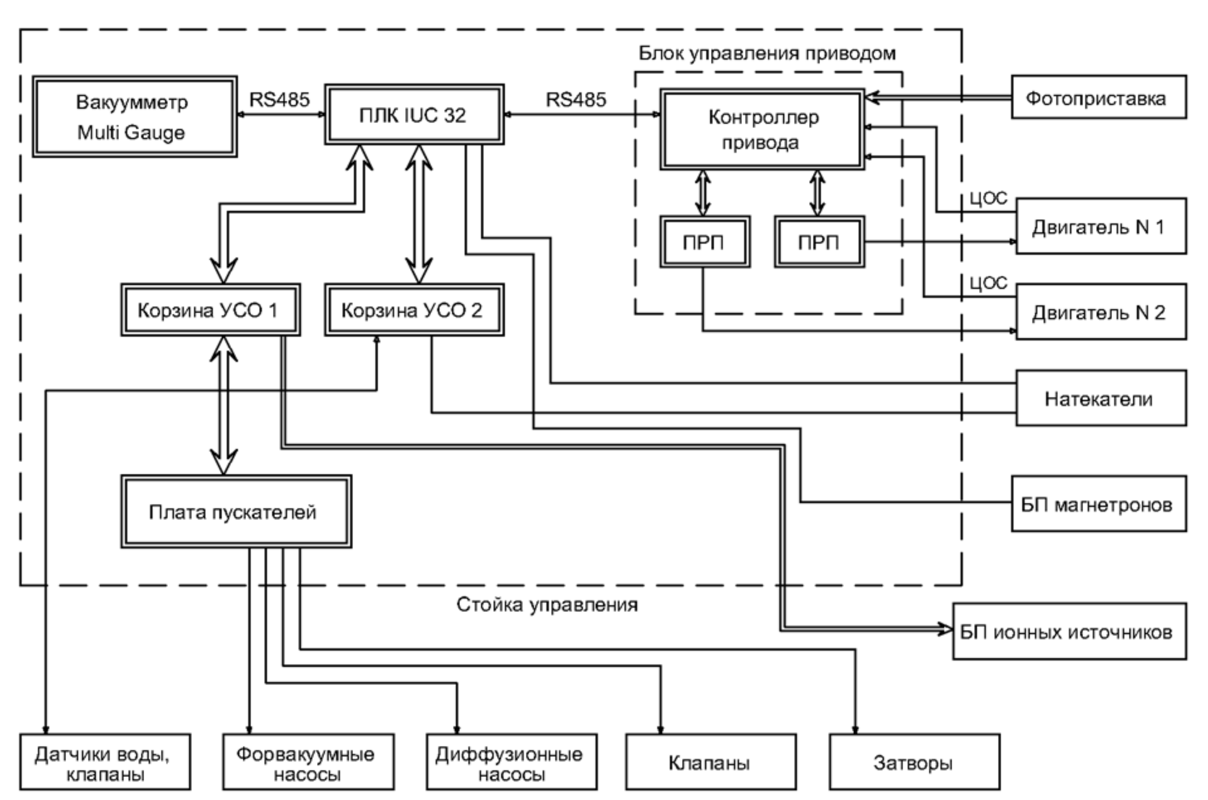


Рис. 2. Структурная схема системы управления установки «Опал-3»

Электропривод, предназначенный для перемещения каретки со стеклом внутри вакуумных камер, состоит из двигателей постоянного тока ДПУ120-550, блоков управления двигателями ПРП5-1 и контроллера перемещения с интерфейсом RS-232C.

Каждый магнетрон и ионный источник имеют собственный блок питания. Источники питания магнетронов обеспечивают максимальный ток 40 А при максимальном рабочем напряжении 660 В. Время срабатывания защиты от короткого замыкания – не более 2 мкс. Возможны три режима работы блока питания: стабилизация тока, напряжения или мощности. Точность стабилизации тока или напряжения – не хуже 1 %. Источник питания имеет интерфейс RS-485.

В установке использованы блоки питания ионных источников ИВЭ-343 фирмы «Консент» (Россия), которые могут обеспечить максимальное выходное напряжение 3 кВ, ток 3 А и максимальную рабочую мощность до 6 кВт. Они имеют только аналоговое управление. Значения выходного напряжения, тока и мощности задаются входным управляющим напряжением в диапазоне от 0 до 10 В.

Взаимодействие ПЛК с компьютером осуществляется через интерфейс ETHERNET, благодаря чему увеличивается скорость обмена информацией по сравнению с интерфейсом RS-232C, который используется в установке «Опал-2». При использовании нескольких подобных установок, применив концентратор ETHERNET, можно объединять ПЛК каждой установки и управляющий компьютер в единую сеть.

Заключение

За 1,5 года эксплуатации установки «Опал-3» имел место один отказ в системе управления: из-за мощной электромагнитной помехи вышел из строя контроллер системы перемещения кассеты. Неисправность была легко обнаружена и устранена. В целом система управления работает практически без сбоев.

Анализ результатов промышленной эксплуатации подтвердил, что разработанная система позволяет:

- автоматизировать контроль и управление технологическим процессом нанесения модифицирующих плазменных покрытий на поверхность стекла;
- повысить качество выпускаемой продукции за счет оперативного выявления отклонений параметров технологического процесса;
- оперативно выявлять предаварийные ситуации, блокировать их развитие и предупреждать об этом оператора;
- создать комфортные условия работы оператора установки;
- автоматически формировать архивы накопленных данных для дальнейшего совершенствования технологического процесса и оборудования.

В месте с тем эксплуатация показала, что система управления не является идеальной. В ней есть ресурсы для совершенствования. Прежде всего, это сокращение потерь времени на принятие решения и выполнение управляющих команд, т.е. повышение её быстродействия. Это позволяет повысить производительность установки в целом.

Авторы выражают сердечную признательность С.В. Меркулову, М.А. Нечаеву, О.В. Пащенко и другим коллегам, оказавшим активное содействие в выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баинов Д.Д., Кривобоков В.П., Легостаев В.Н. Оптимизация параметров плазменных теплоотражающих покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 29–33.
2. Баинов Д.Д., Кривобоков В.П., Легостаев В.Н. Оптимизация просветления теплоотражающих покрытий // Гелиотехника. – 2004. – № 3. – С. 85–91.
3. Ананьин П.С., Асаинов О.Х., Блейхер Г.А., Баинов Д.Д., Жуков В.В., Зоркальцев А.А.,. Косицын Л.Г, Кривобоков В.П., Лебедев Е.В., Легостаев В.Н., Меркулов С.В., Михайлов М.Н., Нечаев М.А., Носкова Т.Г., Пащенко О.В., Пузыревич А.Г., Умнов С.П., Юдаков С.В., Янин С.Н. Плазменная установка для нанесения теплосберегающих покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 53–59.
4. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
5. Жуков В.В., Кривобоков В.П., Янин С.Н. Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 7. – С. 40–45.
6. Меркулов С.В., Лебедев Е.В., Баинов Д.Д. Измеритель оптической толщины пленки // Измерение, контроль, информатизация: Матер. IV Междунар. научно-техн. конф. – Барнаул: АГТУ, 2003. – С. 55–58.
7. Мишель Ж. Программируемые контроллеры: Архитектура и программирование // Пер. с фр. И.Н. Федотова. Под ред. Б.И. Лыткина. – М.: Машиностроение, 1992. – 320 с.
8. Ananin P., Asainov O., Bleikher G., Zubarev S., Kosytsyn L., Krivobokov V., Kuzmin O., Legostaev V., Padusenko A., Paschenko O., Rychkov D., Yanin S. Development of Solid Surface Modification Technologieson the Base of Magnetron Plasma Sources in Nuclear Physics Institute at Tomsk Polytechnic University // Proc. 4th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology KORUS-2000. Part 3: Mechanic Parts and Material Processing. – June 27–July 1, 2000, Ulsan, Korea, 2000. – P. 215–219.
9. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчёт вакуумных систем. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.